

学校编码: 10384

学号: 19820120153895

分类号_____ 密级_____

UDC_____

廈門大學

博 士 学 位 论 文

量子体系中光子和电子与物质相互作用的
探测及调控

Probing and Tuning the Light-matter and Electron-matter
Interaction in the Quantum Regime

李 孔 翌

指导教师姓名: 康俊勇 教授

吴雅苹 博士

李 恒 博士

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2016 年 03 月

论文答辩时间: 2016 年 05 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 05 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

李孔翌

2016 年 3 月 20 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ☒ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

李孔翌

2016 年 3 月 20 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

对光子和电子与物质相互作用的探知与解读、相互作用行为的驾驭与改造是当今凝聚态物理研究的前沿热点，本论文面向该研究领域，以搭建实验平台为起步，以构建优良材料体系为基础，多方位发掘并呈现体系中的相互作用行为，旨在澄清其背后的物理图像与核心机制，并以此为支点，进一步开展更具目的性的量子行为调控。研究内容与研究意义可简要概括为如下几点：

开发新表征技术：我们首先致力于原位综合表征系统这一实验平台的搭建，并进一步发展了双扫描隧道探针表征技术，以及光纤探针配合下多探针协同的微区光学表征技术，为后续量子相互作用现象的探测，乃至更为广泛体系中量子行为的表征提供了重要的技术支持。

发掘新材料体系：在光子与物质相互作用方面，我们提出氮化铝可凭借其高激子谐振强度、高激子极化偏振性以及纵光学波声子参与弛豫的突出特征，作为研究激子极化激元相互作用、以及推动激子极化激元未来应用的优良材料体系。在电子与物质相互作用方面，我们提出单层人工二维金晶格可凭借其量子行为携带与结构自定义的先天优势，作为研究载流子量子混沌动力学输运行为的优良平台。

诠释新量子现象：在光子与物质相互作用方面，我们结合变温光学表征与数值计算，澄清了氮化铝材料中激子极化激元的形成与变温演化机制。在电子与物质相互作用方面，我们凭借低温材料制备与双探针隧道谱表征方法，解读了单层人工二维金晶格中载流子量子混沌散射的物理图像，明确了散射体空位排列密集度与排列对称性在载流子输运动力学特性上起到的决定性作用。

提出新调控策略：在人工二维金晶格体系中，我们提出了以“超原子”为结构单元改造载流子输运行为的调控策略，实现了二维金晶格中宽能量范围内的可调共振输运，也为更为广泛体系中相互作用行为的设计提供了重要的思路参考。

关键词：量子体系；相互作用；探测与调控

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Probing and harnessing the light–matter and electron–matter interaction in the quantum regime has been an extremely active and advanced research field of the condensed matter physics. In this thesis, motivated by the attractive phenomena as well as the potential applications such challenging science has, we start with an exploitation of relevant facility/technologies and a preparation of desired material systems. Thereafter, the phenomena of light–matter (and electron–matter) interaction in the proposed systems are dedicatedly investigated, and the underlying mechanisms of them are unambiguously clarified, thereby providing an accessibility of tuning such interactions in turn. Here we highlight four positive aspects presented in this thesis:

Developing new technologies of *in-situ* characterization. With a startup of building the *in-situ* multi-probe system, we develop the technologies of double-probe scanning tunneling spectroscopy and fiber-probe-assisted micro-optical analysis. Combined with the e-beam analysis, they will serve as a powerful multifunctional toolbox to detect the quantum phenomena and investigate the underlying mechanisms.

Preparing and exploring new material systems. On the aspect of light–matter interaction, we demonstrate that AlN semiconductor can be a mostly adapted material system for the further improvement of exciton–polariton coherence in deep ultraviolet wavelength and the continuation of studies on correlated polariton physics. On the aspect of electron–matter interaction, we present that the artificial two-dimensional Au lattices (2DALs) can serve as a user-defined platform for the studies on quantum chaotic scattering and quantum chaotic dynamics.

Clarifying new phenomena of light–matter (and electron–matter) interaction. On the aspect of light–matter interaction, we identify that the extraordinary behavior of temperature-dependent luminescence originates from the formation of

exciton–polariton because of the intrinsically strong oscillator strength and the purely polarization emission in AlN. On the aspect of electron–matter interaction, we clarify the decisive role of the arrangement of corner-hole vacancies in the formation of band-like transport and the dynamical properties of carrier motion in 2DALs.

Proposing a new strategy of interaction engineering. We propose the strategy of controlled construction of “super-atoms” in 2DALs system, which will open up a possibility of interaction engineering and carrier transport modulation in artificial lattices system.

Keywords: Quantum regime; Interaction; Probing and tuning

目 录

第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 论文构架	7
参考文献	8
第二章 多种探针原位综合表征技术的开发	12
2.1 多种探针原位综合表征系统的搭建	12
2.1.1 样品制备模块	13
2.1.2 综合表征模块	14
2.2 电子束探针表征技术	20
2.3 双扫描隧道探针表征技术	22
2.3.1 表征技术详述	22
2.3.2 相关针尖制备技术	27
2.4 光纤探针配合下的微区光学表征技术	30
2.4.1 表征技术详述	30
2.4.2 表征技术在单量子点体系中的应用	34
2.5 小结	37
参考文献	38
第三章 高质量氮化铝中光子与物质相互作用的探测	42
3.1 研究现状	42
3.2 高质量氮化铝中光子与物质相互作用形成的激子极化激元	45
3.2.1 激子极化激元的形成机制	45
3.2.2 激子极化激元的变温行为	51
3.2.3 激子极化激元与声子的耦合	56
3.3 小结	58
参考文献	59
第四章 单层人工二维金晶格中电子与物质相互作用的探测	65

4.1 研究现状	65
4.2 单层二维金晶格的构筑	67
4.2.1 单层二维金晶格的构筑机理与构筑方式.....	68
4.2.2 调控温度实现单层二维金晶格的构筑.....	73
4.3 单层二维金晶格中电子与物质相互作用导致的输运能带	80
4.3.1 量子混沌散射对载流子输运的影响.....	80
4.3.2 载流子输运的类能带行为.....	89
4.4 小结	96
参考文献	98
第五章 单层人工二维金晶格中电子与物质相互作用的调控.....	105
5.1 研究思路	105
5.2 “超原子”的构建	108
5.3 电子与物质相互作用下的“超原子”耦合调控	113
5.3.1 可控耦合结构的构筑.....	113
5.3.2 可调共振输运的实现.....	116
5.4 小结	120
参考文献	122
第六章 总结与展望	126
附录 博士期间发表的论文	128
致谢.....	129

Table of Contents

1	Introduction.....	1
1.1	Research background	1
1.2	Thesis outline	7
	References	8
2	Exploiting the technologies of <i>in-situ</i> multi-probe analysis	12
2.1	Building the <i>in-situ</i> multi-probe system	12
2.1.1	Sample preparations module	13
2.1.2	<i>In-situ</i> characterizations module	14
2.2	Technology of electron-beam analysis	20
2.3	Technology of double-probe STM/STS	22
2.3.1	Methods	22
2.3.2	Preparation of relevant STM tips	27
2.4	Technology of fiber-probe-assisted micro-optical analysis	30
2.4.1	Methods	30
2.4.2	Application on the single-quantum-dot system	34
2.5	Conclusions	37
	References	38
3	Probing the light–matter interaction in high quality AlN	42
3.1	Background	42
3.2	Light-matter interaction resulting exciton–polariton formation in high quality AlN	45
3.2.1	Formation of exciton–polariton	45
3.2.2	Temperature evolution of exciton–polariton	51
3.2.3	Polariton–phonon interaction	56
3.3	Conclusions	58
	References	59
4	Probing the electron–matter interaction in single-layer artificial 2DALs.....	65

4.1	Background	65
4.2	Fabrication of single-layer 2DALs	67
4.2.1	Principle and technicality	68
4.2.2	Tuning the structure of 2DALs by temperature	73
4.3	Electron–matter interaction resulting band-like transport in single-layer 2DALs	80
4.3.1	Effect of quantum chaotic scattering on the carrier transport property ...	80
4.3.2	Bank-like transport behavior.....	89
4.4	Conclusions.....	96
	References.....	98
5	Tuning the electron–matter interaction in single-layer artificial 2DALs.....	105
5.1	Background and purpose of this work.....	105
5.2	Designer “super-atom”	108
5.3	“Super-atoms” governed transport modulation	113
5.3.1	Controlled structural modification	113
5.3.2	Tunable resonant transport.....	116
5.4	Conclusions.....	120
	References.....	122
6	Summary and outlook	126
	Appendix: List of publications	128
	Acknowledgements	129

第一章 前言

1.1 研究背景

随着材料、结构及器件的制备工艺与技术持续地精细化、多样化,近十年来纳米材料与纳米科技蓬勃发展,并逐渐成为在应用领域突破传统科技极限与局限、追逐“更小更快更强”这一终极目标的生力军与主力军。技术手段的提升与应用前景的开拓,相伴地也推动着上游基础科研的加速前进。当前基础物理与应用物理的研究,在认知尺度上,不仅已深入至单电子、单光子、单原子(分子)、单自旋等基本单元的探测与表征,更拾级而上步入对其直接的操纵与精细的调控^[1-6];在材料物性的控制与功能性的发掘上,已由单纯提升材料质量以及较为“粗放式”地合成制备纳米材料,上升为了在原子尺度上(或者特征尺度上)更具创造性与目的性的“设计”与“构筑”^[7-11]。

然而,这种史无前例的控制力与创造力,并没有满足科学家们探索世界的好奇心与改造世界的雄心壮志。当前凝聚态物理前沿,已由探知电子、光子或物质基本单元,推进至基本单元间相互作用的深入挖掘;对电子或光子行为的单纯控制,相应地也上升为通过引入电子与物质、光子与物质的相互作用以实现更具创造性与想象力的人为操控。这种人为操控,就本质而言是在特征尺度上利用基本单元间的排斥或吸引、散射或限制、甚至更进一步地相互关联耦合,实现对电子或光子内在属性的改造;或者说是,借助当前高精尖的操控与制备技术,人为地加入或加剧以上相互作用,迫使电子或光子发生量子体系下的“内秉性变化”(或理解为广义上的“相变”^①),使改造后的电子或光子拥有了新的物性与行为特征。

显然,这种直接作用于粒子内秉属性、甚至其 Hamilton 量上的改造与重塑,在物理意义上将远远超过对粒子行为的单纯控制与引导,不但大大增加了我们对电子光子操纵的控制自由度,更为我们对凝聚态物理的认知“解锁”了极为丰富而

^① 此处的“相变”并不是严格意义上的“量子相变”(例如超导至 Mott 绝缘体的量子相变),而是宽泛地指代电子或光子内秉物理行为上发生的变化。

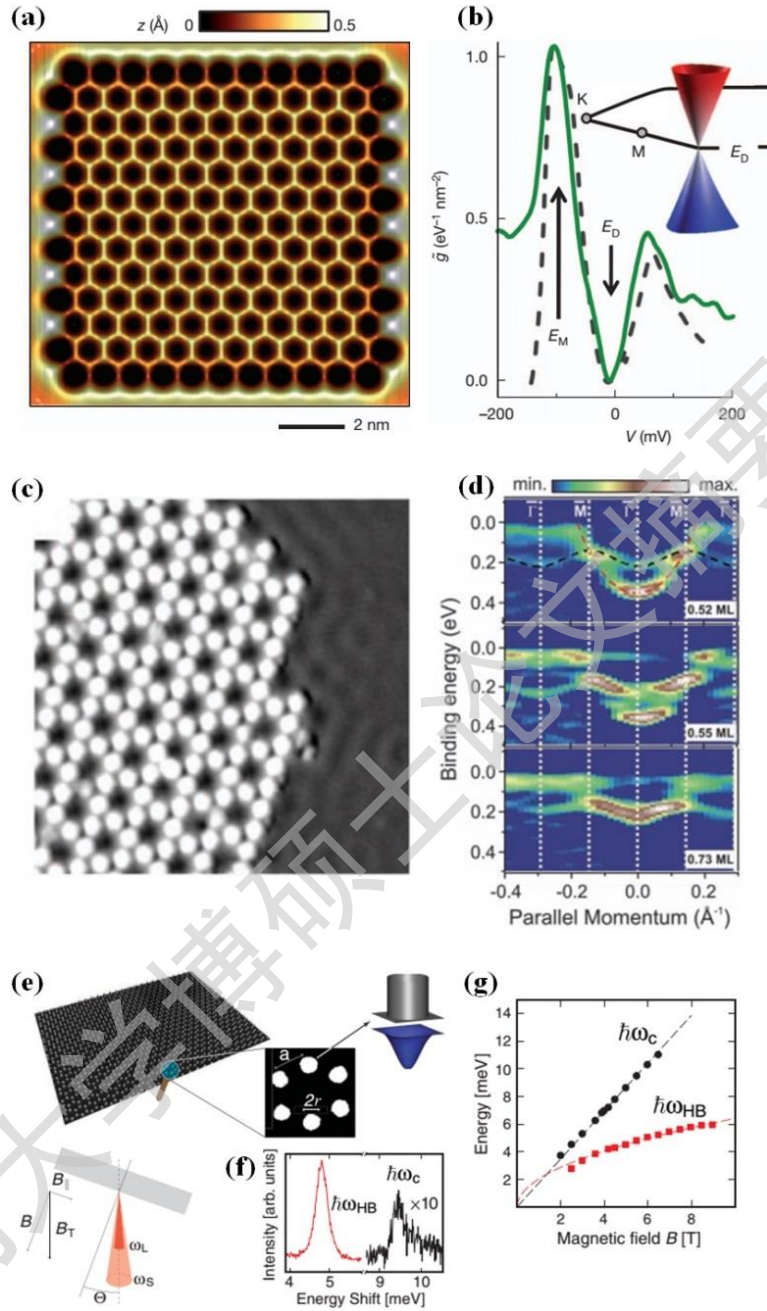


图 1.1 电子与物质相互作用下电子行为的改造

(a) 于 Cu(111) 表面设计编织的“分子石墨烯”的 STM 图像，黑色区域为具备高电势的 CO 分子，分子之间的间隙蓄积着 Cu 表面二维电子气，以三角晶格排布的 CO 分子将二维电子强行规范为了类似于石墨烯结构的电子空间分布；(b) 相应的隧道谱与模拟结果显示“分子石墨烯”中出现了 Dirac 锥点。图片来源于参考文献[12]；(c) 于 Cu(111) 表面自组装的双氢化 DPDI 分子将表面二维电子气限制并区分形成量子点网络；(d) 相应角分辨光电子能谱显示量子点网络中出现了电子能带结构。图片来源于参考文献[13]；(e) 基于 GaAs 基异质结构蚀而成的人工晶格的 SEM 图像；(f) 相应非弹性光散射谱中出现了 Hubbard 能带相关的散射峰 ω_{HB} 与回旋共振模式相关的散射峰 ω_c ；(g) 在磁场下两散射峰将出现分裂，实心点为实验数据，虚线为基于 Hubbard 模型的拟合曲线。图片来源于参考文献[19]。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.